

T-ET 函数法作物需水规律和灌溉制度模型研究

王新^{1,2}, 李晓龙³, 王全九¹

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 新疆水利厅, 新疆 乌鲁木齐 830000;

3. 雨鸟贸易有限公司, 北京 100029)

摘要:以阿克苏首蓿灌溉制度制定为例进行了研究,利用 Penman-Monteith 公式,通过建立作物生长天数与作物需水量的函数 $T-ET$,构建了 $T-ET$ 函数法作物灌溉制度模型。结果显示:采用 32° 喷嘴,射程 20 m,流量 $4.71 \text{ m}^3/\text{h}$,有效控制面积 315 m^2 ,灌溉强度 14.95 mm/h 的喷灌设计,通过计算,该地区首蓿年灌溉次数为 25 次,设计灌溉总量为 750 mm。结论表明通过灌溉制度模型可以快速地得到该地区首蓿的需水规律和相应灌溉制度,该方法对于缺乏灌溉实验资料的区域及作物,简捷地制定出较合理的灌溉制度,具有较强的实用性。

关键词:灌溉制度;作物需水规律;Penman-Monteith 公式;首蓿;喷灌

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)03-0058-05

在特定的种植条件下,制定和推行科学合理的灌溉制度,是实现作物增产节水、农民增收的关键措施,在内陆干旱灌溉农业区,这一环节尤为重要。

制定灌溉制度的常规方法,一般是在区域代表性较强的典型区设置灌溉试验站,通过正规的作物灌溉实验,摸清作物需水规律,获得作物节水、高产的灌溉制度,再结合水源、灌溉设施条件进行调整,最终确定在一定区域内应用的合理灌溉制度。新疆是内陆干旱、灌溉农业区,土地、光热资源丰富,且空间差异性大,决定了新疆种植条件多样化,农作物品种多、区域特征明显的特点。通过设立灌溉试验站,开展不同作物的正规灌溉实验来获取基础数据,进而确定各种作物的灌溉制度,要覆盖新疆绿洲的各种种植条件和主要农作物,需要设立为数众多的灌溉试验站,这在目前是不现实的。因此,虽然新疆滴灌等田间高效节水面积已达到 166.7 万 hm^2 ,占到农田总面积的 33%,但是不同区域、不同作物合理灌溉制度的研究与应用,是一个薄弱环节,由此,在很大程度上影响了滴灌等大规模田间高效节水设施节水增产效益的正常发挥。

在没有区域灌溉试验站,不具备灌溉实验资料的情况下,如何通过气象、土壤等相关资料,初步确定作物的灌溉制度,进而根据当地灌溉条件以及丰产调查资料,制定出比较科学合理的适用灌溉制度,指导区域农业灌溉,对像新疆等地处内陆干旱区、灌溉实验基础设施十分缺乏的西部省区,农业节水、增

产、增收的重要意义将是不言而喻的。李彦、胡顺军、史晓楠等^[1-7]对新疆塔里木盆地、阿克苏地区等不同地区利用 Penman-Monteith 公式或 Penman 修正式计算了该地区的参考作物的潜在腾发量,并分析了其影响因素。为此本文基于彭曼公式提出了 $T-ET$ 函数法作物灌溉制度模型,即通过建立作物生长天数与作物需水量的函数 $T-ET$,进而建立作物灌溉制度数学模型。对于缺乏灌溉实验资料的区域及作物,可以利用模型简捷地制定出较合理的灌溉制度,具有较强的实用性。

1 $T-ET$ 函数法作物灌溉制度模型

作物耗水量的计算方法很多,概括起来分为直接计算法和间接计算法。直接计算法的经验公式由于具有较强的区域局限性,其使用范围受到很大的限制。间接计算法是通过参考作物需水量 ET_0 及作物系数 K_c 的乘积得到的。目前国际上较通用的作物需水量计算法是间接法,即 $ET = ET_0 \times K_c$ 。 ET_0 对作物需水量的影响要比作物系数大很多。有关作物耗水量的研究以单点的和单一作物的计算模型较多。目前应用最多的是联合国粮食及农业组织 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 方法,认为 Penman-Monteith 计算值比较接近实际值,适用范围广,使用一般气象资料即可计算参考作物蒸发蒸腾量^[8-11]。

1.1 作物需水量及计算方法

根据彭曼公式计算参考作物日需水量,对于西

收稿日期:2012-02-03

基金项目:水利部“农业高效节水技术集成示范(TG1152)”项目

作者简介:王新(1959—),男,河北藁县人,在读博士研究生,高级工程师,主要从事农业节水方面的科研及管理工作。

北干旱地区,一般计算其生长期内的日需水量。将计算出的日需水量进行累加,参考作物生长期第1天需水量记为 ET_1 ,第2天记为 ET_2 ,则生长期前2天的需水量之和 $ET_0 = ET_1 + ET_2$,依此类推,生长期 T 天内需水量之和 $ET_0 = \sum_{i=1}^T ET_i$ 。研究发现,生长期天数(T)与其相对应的需水量(ET_0)有着很好的多项式拟合关系,其相关系数达0.97以上。其函数表达式如下:

$$ET_0 = \sum_{i=1}^T ET_i = k_4 T^4 - k_3 T^3 + k_2 T^2 + k_1 T + c$$

(1)

式中, $\sum_{i=1}^T ET_i$ 为作物参考需水量的累加值; T 为作物生长天数; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为多项式系数; c 为常数项。

因为回归方程的自变量是作物生长天数,所以

以我们可用此回归方程计算指定生长天数内的 ET_0 之和,计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{k_4(T_2^4 - T_1^4) - k_3(T_2^3 - T_1^3) + k_2(T_2^2 - T_1^2) + k_1(T_2 - T_1)}{T_2 - T_1}$$

(2)

式中, ET_0 为参考作物在 T_2 至 T_1 时间内的日均需水量; $T_2 - T_1$ 为作物生长天数。

1.2 作物根区土壤可利用水分计算

灌溉前作物从根区土壤中消耗的土壤水分可按(3)式计算。

$$P_{SW} = A_{WH} \times R_z \times A_D$$

(3)

式中, P_{SW} 为作物可从根区土壤中消耗的水量(mm); A_{WH} 为不同质地土壤的田间有效水量(mm/mm),由表1选取; R_z 为作物根区平均深度(mm); A_D 为作物不受旱时各种土壤的最大可消耗水量比例,由表2选取。

表1 不同土壤质地类型的田间有效水量(A_{WH})

Table 1 Effective amount of water (A_{WH}) in fields with different types of soil texture

土壤质地分类 Soil texture classification	粘土 Clay	粉粘土 Clay powder	粘壤土 Clay loam	壤土 Loam	砂壤土 Sandy loam	壤质砂土 Loamy sand	砂土 Sand
田间有效水量(cm/m) Effective water in field	17~25	13~21	14~21	12~19	10~14	6~10	3~6

表2 作物不受旱时各种土壤的最大可消耗水量(A_D)

Table 2 Maximal water consumption (A_D) of different types of soil when crops are not affected by drought

土壤质地分类 Soil texture classification	粘土 Clay	粉粘土 Clay powder	粘壤土 Clay loam	壤土 Loam	砂壤土 Sandy loam	壤质砂土 Loamy sand	砂土 Sand
作物可消耗水量(%) Water consumption by crops	20	40	40	50	50	50	60

1.3 作物耗水量回归曲线

土壤中消耗的水量与作物根系深和土壤类型有着密切的关系,如表3所示。计算结果表明,作物根系深度为 h mm情况下作物可从土壤中消耗水量与土壤类型编号 S 之间具有很好的多项式拟合关系,其回归曲线方程如下:

$$P_{SW} = a_4 S^4 - a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + b$$

(4)

式中, S 为土壤类型编码; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为多项式系数; b 为常数项。

1.4 作物基本灌溉需水量计算

作物基本灌溉需水量应根据植物设计需水量和有效降雨,并考虑灌水器喷洒水量分布的均匀程度来决定,可按式(5)计算。

表3 作物可从土壤中消耗的水量

Table 3 Water consumption of crop obtained from soil

S	土壤类型 Soil type	土壤特性值 Value of soil properties		根系深度 Depth of root system (mm)
		A_{WH}	A_D	
1	粘土 Clay	0.17	0.2	34
2	粉粘土 Clay powder	0.13	0.4	52
3	粘壤土 Clay loam	0.14	0.4	56
4	壤土 Loam	0.12	0.5	60
5	砂壤土 Sandy loam	0.10	0.5	50
6	壤质砂土 Loamy sand	0.06	0.5	30
7	砂土 Sand	0.03	0.6	18

$$I_R = \frac{P_{WR} - P_E}{\eta_u}$$

(5)

式中, I_B 为作物基本灌溉需水量(mm); P_{WR} 为作物需水量(mm); P_E 为有效降雨量(mm); η_u 为灌溉水利用系数。根据喷灌工程技术规范(GB/T 50085 - 2007), 在风速低于 3.4 m/s 时, η_u 应不低于 0.76 ~ 0.88, 风速大于 3.4 m/s 时, η_u 应不低于 0.66 ~

0.78。

1.5 设计灌水周期

设计灌水周期应根据灌溉前作物可从根区土壤中消耗的水量和作物多年平均日净需水量确定。灌水周期可按式(6)计算:

$$T = \frac{P_{SW}}{I_D} = \frac{(a_4 S^4 - a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + b) \times (T_2 - T_1)}{KC \times (k_4(T_2^4 - T_1^4) - k_3(T_2^3 - T_1^3) + k_2(T_2^2 - T_1^2) + k_1(T_2 - T_1))} \quad (6)$$

式中, T 为设计灌水周期, d; P_{SW} 为作物可从根区土壤中消耗的水量, mm; I_D 为作物多年平均日净需水量, mm/d。

2 举例—阿克苏紫花苜蓿喷灌灌溉制度确定

根据以上研究分析获得的基本方法和公式, 对阿克苏市农场紫花苜蓿喷灌灌溉制度进行计算, 作为例子, 对本方法做一个具体诠释。紫花苜蓿种植面积为 13.3 hm², 土质为砂壤土, 紫花苜蓿根系深 30 cm。喷灌的灌溉设计保证率为 85% ~ 95%, 分析阿克苏市多年气象资料, 按最不利原则, 选择接近设计灌溉保证率的年份作为典型年, 用典型年阿克苏气象站的实测资料作为依据计算紫花苜蓿灌溉制度。

2.1 紫花苜蓿需水量计算

2.1.1 紫花苜蓿年需水总量 阿克苏地区紫花苜蓿生长期在每年的 4 月至 10 月, 取计算时间段为 4 月中旬至 10 月中旬。根据公式(1), 逐一计算各生长期紫花苜蓿需水量; 以紫花苜蓿需水量累加值为因变量, 生长天数为自变量, 进行线性回归, 得到紫花苜蓿需水量函数如下, 其曲线图如图 1 所示。

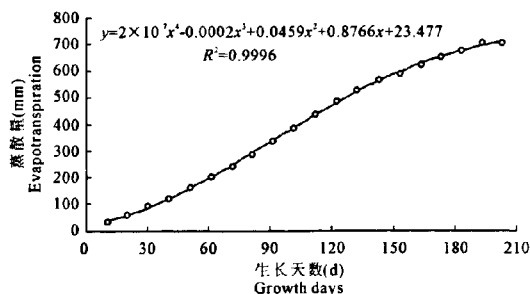


图 1 $T-ET_0$ 函数曲线图

Fig.1 Curve of $T-ET_0$ function

$$\sum ET_0 = 2 \times 10^{-7} T^4 - 0.0002 T^3 + 0.0459 T^2 + 0.8766 T + 23.477 \quad (7)$$

苜蓿每年生长期为 200 d 左右, 查阅有关资料, 紫花苜蓿 K_C 取 1.0, 计算年需水量 $ET_{\text{年}}$:

$$ET_{\text{年}} = K_C \times \sum ET_0 = 754 \text{ mm}$$

则 13.3 hm² 苜蓿年需水量为:

$$W = 754 \times 200 \times 667/1000 = 10.058 \times 10^4 (\text{m}^3/\text{年})$$

2.1.2 紫花苜蓿根系耗水量回归曲线 由公式(4)得, 在不同土壤类型中紫花苜蓿根系 60 cm 深消耗水量回归方程如下, 回归曲线如图 2 所示。

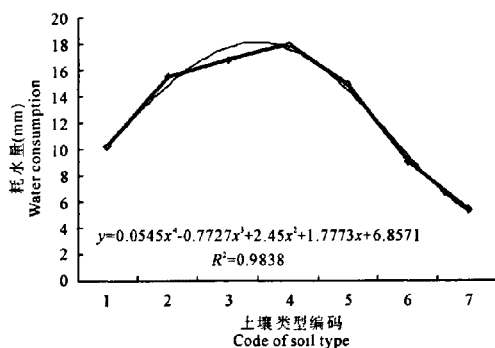


图 2 不同土壤中紫花苜蓿耗水量曲线

Fig.2 Curve of water consumption of alfalfa in different types of soil

$$P_{SW} = 0.109 S^4 - 1.546 S^3 + 4.9 S^2 + 3.554 S + 13.714 \quad (8)$$

根据表 3, 种植区土壤为砂壤土, 查得 $S = 5$, 根据(8) 计算可得: $P_{SW} = 30 \text{ mm}$

2.1.3 有效降雨 阿克苏地区山前冲积沉积平原在沙漠“旱海”的影响下, 降水很少, 年降水量在 42 ~ 95 mm 之间, 典型年份 2009 年降水量仅为 52.4 mm, 月均降水量仅为 4.37 mm, 占总降水量的 8.3%, 因此本例中可不考虑有效降雨, 取 $P_E = 0$ 。

2.1.4 基本灌溉水量 由式(5)得作物基本灌溉需水量, η_u 取 0.8, 则: $I_B = 942 \text{ mm}$, 即每公顷需灌溉水 9 420 m³。

2.2 紫花苜蓿灌溉制度

2.2.1 喷洒强度 喷灌设计采用 32[#] 喷嘴, 射程 $R = 20 \text{ m}$, $Q = 4.71 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

取紫花苜蓿种植区设计风速 4 m/s, 根据 GB/T 50085 - 2007《喷灌工程技术规范》, 组合间距在垂直风向取(0.8 ~ 0.6) R , 平行风向取(1.1 ~ 1) R , 通过内插法求得垂直风向 0.69 R , 平行风向 1.05 R , 采

用全圆式喷洒矩形布置,则:

支管垂直风向布置,沿支管的喷头间距 a 与风向垂直。垂直主风向间距 $a = 0.69R = 0.69 \times 20 = 13.8$ m,取 $a = 15$ m。

平行主风向间距 $b = 1.05R = 1.05 \times 20 = 21$ m,

$$T = \frac{P_{sw}}{I_D} = \frac{(0.109S^4 - 1.546S^3 + 4.9S^2 + 3.554S + 13.714) \times (T_2 - T_1)}{K_C \times [2 \times 10^{-7}(T_2^4 - T_1^4) - 0.0002(T_2^3 - T_1^3) + 0.0459(T_2^2 - T_1^2) + 0.8766(T_2 - T_1)]}$$

为了灌溉管理方便,按照月来划分灌水周期。通过以上计算,确定出的紫花苜蓿生长期内灌溉制度如表4所示,研究区苜蓿年灌溉次数为25次,设计灌溉总量为 $30 \times 25 = 750$ mm。

从表4可以看出,苜蓿在4~5月的生长初期由于气温较低,月均耗水量较小,仅为2.98~3.28

取 $b = 21$ m。

有效控制面积为 $A = 315$ m²,灌溉强度为: $P_R = 14.95$ mm/h,小于规范规定的15 mm/h。

2.2.2 设计灌水周期 灌水周期按式(6)计算得出:

mm/d;从6月开始,该地区气温明显升高,月均耗水量明显增加,并在7月达到最大,在各月灌溉定额相同的情况下增加该月的灌溉次数以满足苜蓿的需水量;8月以后,耗水量减小,因此灌水周期相应增长以及灌溉次数也随之减小,在满足苜蓿需水要求的同时达到节水目的。

表4 苜蓿灌溉制度制定表

Table 4 Development of irrigation schedule for alfalfa

月 Month	天数(d) Days	月总 ET_0 Monthly total ET_0 (mm/d)	月平均 ET_0 Average monthly ET_0 (mm/d)	灌水周期(天) Irrigation cycle (d)	灌水定额 Irrigation amount (m ³)	灌溉次数 Irrigation frequency
4	30	89.46	2.98	2.98	10	30
5	61	101.83	3.28	3.28	9	30
6	91	124.52	4.15	4.15	7	30
7	122	152.83	4.93	4.93	6	30
8	153	128.87	4.16	4.16	7	30
9	183	84.21	2.81	2.81	11	30
10	214	78.45	2.53	2.53	11	30

3 结 语

灌溉制度的制定与作物种类、气候、土壤以及田间管理有着密切的关系,是一项非常复杂的工作。传统灌溉制度的制定基于大量田间试验而得出,制定周期较长,本研究采用了基于 T - ET 函数法这样一种新的方法进行尝试,并以阿克苏苜蓿灌溉制度制定为例进行了研究,研究表明,苜蓿在4、5月气温相对较低时,耗水量较小,相应的灌水周期较长,在6~8月的主要耗水期,其灌水周期减小以及灌水次数增加以满足苜蓿的需水要求,在苜蓿成熟期,受气温下降影响,耗水量显著减小,其灌水周期和灌水次数也相应调整。通过实例表明该方法可以得到合理的灌溉制度,用灌溉制度模型可以快速得到某一地区作物的需水规律和相应灌溉制度,并可对已有的灌溉制度进行优化,为作物增产增效提供有力保障,但对不同地区不同作物的需水规律及灌溉制度模型的推广和应用仍需通过进一步的试验检验和完善。

参 考 文 献:

- [1] 李 彦,陈祖森,张 保,等.参考作物蒸发蒸腾量的多元线性回归模型研究[J].新疆农业大学学报,2005,28(1):70-72.
- [2] 郑和祥,郭克贞,史海滨,等.锡林郭勒草原饲料作物需水量计算方法比较及相关性分析[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):51-57.
- [3] 李 彦,王金魁,门 旗,等.修正温度法计算农作物蒸散量 ET_0 研究[J].灌溉排水学报,2004,23(6):62-64.
- [4] 胡顺军,潘 渝,康绍忠,等.Penman-Monteith 与 Penman 修正式计算塔里木盆地参考作物潜在腾发量比较[J].农业工程学报,2005,21(6):30-35.
- [5] 史晓楠,王全九,王 新,等.参考作物腾发量计算方法在新疆地区的适用性研究[J].农业工程学报,2006,22(6):19-23.
- [6] 王则玉,冯耀祖,陈署昆,等.彭曼-蒙太斯法制定阿克苏红枣根渗灌灌溉制度[J].新疆农业科学,2010,47(11):2189-2194.
- [7] 赵 旭,李 毅,刘俊民.新疆旱区草地参考作物腾发量随机模拟及其应用[J].水利学报,2008,39(11):1267-1272,1278.
- [8] 徐俊增,彭世彰,张行南,等.两种 Penman-Monteith 公式计算草坪草参考腾发量的适用性[J].农业工程学报,2009,25(12):32-37.
- [9] 刘晓英,林而达,刘培军.Priestley-Taylor 与 Penman 法计算参照作物腾发量的结果比较[J].农业工程学报,2003,19(1):32-36.
- [10] 王声锋,段爱旺,张展羽.半干旱地区不同水文年 Hargreaves 和

P-M 公式的对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 29-33.

森林下垫面中参数的确定[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6):

[11] 李孝广, 毕华兴, 刘 胜, 等. Penman-Monteith 蒸散模型及其在

257-261.

Study on model of crop water requirement regulation and irrigation schedule based on *T-ET* function method

WANG Xin^{1,2}, LI Xiao-long³, WANG Quan-jiu¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Xinjiang Water Resources Bureau, Urumqi 830000, China; 3. Rain Bird Trading Co. Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: A study was carried out to develop irrigation schedule for alfalfa in Aksu as an example. In use of Penman-Monteith formula, *T-ET* functional model of crop irrigation schedule was established through the function of crop growing days and water requirement. The results show that, irrigation should be made 25 times annually with a total irrigation amount of 750 mm when the irrigation was designed as: using 32# spray nozzle, with a spray range of 20 m, flow rate of 4.71 m³/h, effective control area of 315 m² and irrigation intensity of 14.95 mm/h. The water requirement regulation of alfalfa and the corresponding irrigation schedule can be obtained by using the model, which is practical way to make irrigation schedule and promote water use efficiency in certain regions.

Keywords: irrigation schedule; crop water requirement regulation; Penman - Monteith formula; alfalfa; sprinkler irrigation

(上接第 57 页)

Wheat coleoptile and emergence vigor and drought-resistance

PAN Qian-ying¹, WEN Xue-fei¹, PAN Tian-yuan², SHI Yin-hong², PAN Tian-yu², PAN Xing-lai^{2*}

(1. College of Foreign Languages, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China;

2. Cotton Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Yuncheng, Shanxi 044000, China)

Abstract: Sixty-nine research papers show that, wheat varieties with longer, thinner, stiffer and faster coleoptile, always give better seedling emergence vigor. Based on years' investigations, from the viewpoints of morphogenesis and cell behavior, the coleoptile internode of wheat is located above the coleoptile, not below the coleoptile. Both the coleoptile and the coleoptile internode are produced by the hypocotyl. While the rhizome of corn is below its coleoptile, it is produced by the mesocotyl. Pictures show that the second coleoptile of the shoot is naturally split, and several leaf internodes can occur in deep-sown conditions, and vernalization researchers should attach important to this phenomenon. The genetic length, physiological length and the environmental length of wheat coleoptile are summarized. Breeding wheat for fat quality is mentioned. Three suggestions are proposed for Chinese wheat workers.

Keywords: wheat; coleoptile; mesocotyl; coleoptile internode; dwarf stem; drought resistance